

# 分体承压阳台壁挂式太阳热水器的热性能分析

丁 祥, 高文峰<sup>\*</sup>, 刘 滔, 林文贤

(云南师范大学教育部可再生能源材料先进技术与制备重点实验室, 太阳能研究所, 昆明 650092)

**摘 要:** 通过对在昆明地区搭建的一种间接式强制循环分体承压阳台壁挂式平板型太阳热水器的分析, 建立了热水器系统的数学模型, 并对冬季晴天天气情况下的得热量、平均日效率、瞬时效率、贮热水箱热损系数、系统平均热损因数等热水器热性能参数进行了多天测试和分析。结果表明, 这种太阳热水器的热性能良好, 符合家庭生活用水的要求, 适合与建筑进行一体化设计; 太阳辐射量是影响太阳热水器热性能最显著的因素; 分体承压立式贮热水箱的保温性能良好, 但还需继续对这种贮热水箱的温度分层情况作进一步研究。

**关键词:** 得热量, 太阳辐射, 太阳热水器, 分体承压, 间接式强制循环, 热性能

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.10.041

中图分类号: TK512

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-10-0233-05

丁 祥, 高文峰, 刘 滔, 等. 分体承压阳台壁挂式太阳热水器的热性能分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 233-237.

Ding Xiang, Gao Wenfeng, Liu Tao, et al. Thermal performance of solar water heater hanged on balcony wall with separate pressure bearing[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 233-237. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

随着太阳能产业的迅速发展, 选用太阳热水器不仅要保证使用功能完善, 还应满足建筑美观的要求, 太阳能与建筑一体化是未来太阳能热水利用发展的必然趋势。分体承压阳台壁挂式平板型太阳热水器是一种适用于对热水供应量要求大, 对用热水要求高和建筑外观要求严格的太阳能产热水设备, 特别适合城市高层建筑和别墅型建筑使用<sup>[1]</sup>。

目前关于此种类型太阳热水器的热性能, 国内外尚无系统性的深入研究, 部分是通过理论分析, 有的是采用试验研究, 还有的是利用 TRNSYS 模拟。Kabariti 等<sup>[2]</sup>对自然循环平板型太阳热水系统进行了组件及系统的试验测试与 TRNSYS 模拟分析; Belessiotis 等<sup>[3]</sup>从理论上分析了自然循环平板型太阳热水系统的热性能; 杨坚<sup>[4]</sup>对自然循环平板型太阳热水系统的热性能进行了理论及试验研究; 张有刚<sup>[5]</sup>对具有夹层换热器水箱的间接式自然循环平板型太阳热水器的热性能进行了理论及试验研究; 韩俊峰等<sup>[6]</sup>对分体承压 U 型管式真空管太阳热水器进行了热性能分析与试验研究; 周智勇等<sup>[7]</sup>采用 TRNSYS 模拟对夏热冬暖地区间接式强制循环平板型太阳热水系统的

贮热水箱换热盘管面积对系统热性能的影响进行了研究; 戚学贵等<sup>[8]</sup>对强制循环平板型太阳热水系统的热性能进行了动态特性分析。

本文的研究通过搭建间接式强制循环的分体承压阳台壁挂式平板型太阳热水器试验平台, 以理论分析和试验测试的方法来探究这种太阳热水器的热性能, 为今后利用 TRNSYS 瞬态计算机仿真模拟作更进一步的研究提供试验数据及理论依据, 为太阳能与建筑一体化的设计及工程提供科学依据。

## 1 系统简介

本试验平台位于云南师范大学太阳能研究所楼顶, N25.01°, E102.68°, 海拔 1 910 m。所在地云南省昆明市属于低纬度高海拔地区, 年太阳总辐射量可达 5 182.88 MJ/m<sup>2</sup>, 太阳辐射资源丰富。所设计安装的热水器系统部件及相关参数见表 1。

表 1 系统部件  
Table 1 System components

部件名称	机构材质	相关参数
平板型太阳集热器 P6-5-B-T	镀黑铬涂层的全紫铜板芯, 铝合金边框, 镀锌背板, 4 mm 厚钢化玻璃, 岩棉及聚乙烯保温材料。	2 000×1 000×80 mm <sup>3</sup> ×2, 轮廓采光面积 3.3 m <sup>2</sup> , 吸收率 ≥ 0.95, 发射率 ≤ 0.15。
贮热水箱 CP-SXTC200-00	分体承压式, 搪瓷内胆, 聚氨酯保温材料。	标称容积 200 L。
换热器	水箱下部内置, 铜质环形换热盘管, 内部循环换热工质为水。	换热面积 0.9 m <sup>2</sup> 。
控制器 SR868C8	数码可视集成式	温差控制, 下限 2℃, 上限 8℃。
循环水泵 WILO STAR-RS15/6	屏蔽式循环增压型	功率 92 W/67 W/44 W, 全扬程 6.8 m/5.9 m/4 m。
循环管道	PP-R 给水管	DN25, 总长 7 m。
支架	角钢	倾角 60°。

收稿日期: 2010-12-03 修订日期: 2011-09-14

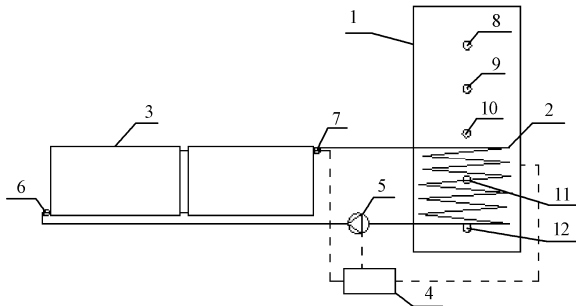
基金项目: 国家自然科学基金 (50879074, 11072211); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20105303110001); 973 计划前期研究专项 (2007CB216405); 云南省联合支持国家科技计划 (2008GA014)。

作者简介: 丁 祥 (1986—), 男, 云南省祥云县人, 从事太阳能热利用及计算流体力学方向研究。昆明 云南师范大学太阳能研究所, 650092。Email: sheva7@163.com

\*通信作者: 高文峰 (1970—), 男, 副教授, 从事太阳能热利用及计算流体力学方向研究。昆明 云南师范大学太阳能研究所, 650092。Email: wenfenggao@163.com

另外, 还有温度测量、太阳辐照量测量、数据自动采集等一系列测试部件。试验系统图如图1所示。

集热器内的循环工质(水)接收太阳辐照加热后, 通过循环泵循环至贮热水箱里的换热器, 换热器中换热盘管里的高温循环水与水箱里的低温水换热后, 向用户提供一定温度的热水。系统采用通过温差控制的强制循环方式, 承压水箱可位于室内任意合适的位置, 且采用立式放置, 节省空间, 布置灵活。



1. 贮热水箱 2. 换热盘管 3. 平板型集热器 4. 温差控制器 5. 循环水泵 6. 集热器入口流体温度  $T_{ic}$  温度探头 7. 集热器出口流体温度  $T_{oc}$  温度探头 8, 9, 10, 11, 12. 贮热水箱上中下5个温度探头

图1 试验系统图

Fig.1 Schematic of the experiment setup

## 2 系统数学模型

对于由以上部件组成的太阳能热水器, 其系统能量平衡方程主要有以下4个:

1) 集热器能量平衡方程<sup>[9]</sup>:

$$(Q_u)_c = A_c [G(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)] \quad (1)$$

$$(Q_u)_c = F'A_c [G(\tau\alpha) - U_L(T_{fm} - T_a)] \quad (2)$$

$$(Q_u)_c = F_R A_c [G(\tau\alpha) - U_L(T_{ic} - T_a)] \quad (3)$$

式中,  $(Q_u)_c$  为集热器获得的有用能, J;  $A_c$  为集热器轮廓采光面积,  $m^2$ ;  $G$  为单位面积瞬时太阳辐照度,  $W/m^2$ ;  $(\tau\alpha)$  为盖板系统对于直射和散射辐射的透过率与吸收率的乘积;  $U_L$  为集热器的总热损系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $F'$  为集热器的效率因子;  $F_R$  为集热器的热转移因子;  $T_p$  为集热器的平均板温,  $^\circ C$ ;  $T_{fm}$  为集热器中流体的平均温度,  $^\circ C$ ;  $T_{ic}$  为集热器中流体的进口温度,  $^\circ C$ ;  $T_a$  为环境温度,  $^\circ C$ 。

式(2)和式(3)将集热器复杂的设计和计算等问题集中归结于集热器的效率因子  $F'$  和热转移因子  $F_R$ 。  $F'$  主要取决于集热器吸热板的构造和传热性能;  $F_R$  描述了传热工质转移能量的能力, 是集热器单位时间有用输出能量与其收集有用能量的比值。

2) 贮热水箱能量平衡方程:

$$(\dot{m}C_p)_s \frac{dT_s}{dt} = (Q_u)_s - U_s A_s (T_s - T_a) - L \quad (4)$$

式中,  $(\dot{m}C_p)_s$  为贮热水箱的热容量,  $kJ/^\circ C$ ;  $\frac{dT_s}{dt}$  为贮热水箱平均水温随时间变化率,  $^\circ C/s$ ;  $(Q_u)_s$  为贮热水箱的有

用能, J;  $U_s$  为贮热水箱的热损失系数;  $A_s$  为水箱外表面积,  $m^2$ ;  $T_s$  为贮热水箱内的平均水温,  $^\circ C$ ;  $L$  为贮热水箱供给负荷的能量, J。

由于带有换热盘管的贮热水箱不像完全预混式水箱那样存在剧烈的掺混现象, 因此贮热水箱内的水温在垂直方向上存在一定的分层现象。对于间接式强制循环系统, 贮热水箱一般按分层水箱处理。

3) 换热器能量平衡方程<sup>[10]</sup>:

$$Q_{HX} = (Q_u)_c = (\dot{m}C_p)_{\min} \varepsilon (T_{oc} - T_s) \quad (5)$$

式中,  $Q_{HX}$  为换热器换热量, J;  $(\dot{m}C_p)_{\min}$  为换热器的换热盘管与水箱中流体的热容率较小的值,  $kJ/^\circ C$ ;  $T_{oc}$  为集热器中流体的出口温度, 也就是换热器的换热盘管内部流体的温度,  $^\circ C$ ;  $\varepsilon$  为换热器的有效度。

4) 系统控制器控制方程:

$$(Q_u)_c = F(\dot{m}C_p)_c (T_{oc} - T_s) \quad (6)$$

式中,  $F$  为控制器控制系数。

在强制循环系统中, 系统流量为定值。设控制器控制温差为  $\Delta T$ , 当  $(T_{oc} - T_s) > \Delta T$  时,  $F=1$ , 表示控制器接通, 水泵工作; 当  $(T_{oc} - T_s) < \Delta T$  时,  $F=0$ , 表示控制器断开, 水泵停止工作。通常将控制温差  $\Delta T$  设置为上、下限, 一般为  $8^\circ C$  和  $2^\circ C$ , 当温差超过上限时, 循环泵运行; 低于下限时, 循环泵停止工作。另外, 当贮热水箱平均水温高于最高设定温度时, 循环泵停止运行, 与控制温差  $\Delta T$  无关。

## 3 系统试验方法

按照 GB/T 19141—2003《家用太阳能热水系统技术条件》<sup>[11]</sup>、GB/T 18708—2002《家用太阳能热水系统热性能试验方法》<sup>[12]</sup>所要求的太阳能热水器热性能技术条件及测试方法, 对所搭建的热水器进行了测试。

### 3.1 测试装置及测点布置

太阳能热水器的热性能与室外环境参数(太阳辐照、室外干球温度、环境风速等), 集热器进出口温度, 循环流量及水箱水温等有直接关系。

试验测试采用 TBQ-2 型太阳总辐射表测量集热器倾斜面的太阳辐照; PTWD2A 型温度传感器测量集热器进出口温度、水箱水温及环境温度; 另外采用 TRM-2 型温度辐照记录仪采集太阳辐照及温度数据。具体的测点布置如图1所示。

### 3.2 测试步骤

1) 分体承压贮热水箱内每天重新上满冷水。在满足集热器倾斜面上的日太阳辐照量大于  $17 MJ/m^2$  的情况下, 对系统进行多天的白天室外试验, 以及多次确定贮热水箱热损系数的夜间热损试验。

2) 每隔 5 s 采集 1 次各种温度和太阳辐照数据, 1 min 记录 1 次数据。太阳辐照需记录累计太阳辐照量  $H$  和瞬时太阳辐照度  $G$ 。

3) 采用混水法对系统得热量进行测试, 从贮热水箱上满新水开始, 共计 8 h。

4) 在日落后对贮热水箱热损系数进行测定, 水箱平

均水温必须高于 50℃，从北京时间 20:00 到凌晨 4:00，共计 8 h，每隔 1 h 记录 1 次水箱水温及周围环境温度，共取 9 次数据。

### 3.3 数据处理方法

热水器得热量是指在一定日太阳辐照量下，贮热水箱内水温不低于 45℃时，单位轮廓采光面积贮热水箱内水的得热量。若贮热水箱实际水容量为  $M$ ，试验开始时水箱内平均水温为  $t_b$ ，结束时平均水温为  $t_e$ ，集热器轮廓采光面积为  $A_c$ ，则热水器得热量为：

$$Q_s = \frac{MC_p(t_e - t_b)}{A_c} \quad (7)$$

试验结果可由在不同太阳辐照条件下的输入-输出图表示。家用太阳能热水器的性能可表示为：

$$Q_s = a_1H + a_2(t_{ad} - t_b) + a_3 \quad (8)$$

式中，系数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  由最小二乘法确定； $H$  为累积太阳辐照量， $\text{MJ}/\text{m}^2$ ； $t_{ad}$  为周围环境空气平均温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

对于太阳能热水器，其热性能的好坏还可由系统平均日效率和瞬时效率来判定<sup>[13]</sup>。

系统平均日效率：

$$\eta_d = \frac{MC_p(t_e - t_b)}{A_c H} \quad (9)$$

系统瞬时效率：

$$\eta = \frac{MC_p(t_{i+1} - t_i)}{A_c(H_{i+1} - H_i)} \quad (10)$$

衡量一个热水器保温性能好坏可由系统平均热损因数决定，它是指在无太阳辐照条件下的一段时间内，单位时间、单位水体积的太阳能热水系统贮水温度与环境温度之间单位温差的平均热量损失。

由国标可知，贮热水箱热损系数为：

$$U_s = \frac{\rho_w c_{pw} V_s}{\Delta \tau} \ln \left[ \frac{t_i - t_{as(av)}}{t_f - t_{as(av)}} \right] \quad (11)$$

式中， $V_s$  为贮热水箱实际贮水容积， $\text{m}^3$ ； $t_i$  为试验开始时贮热水箱的平均水温， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_f$  为试验结束时贮热水箱的平均水温， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_{as(av)}$  为试验过程中的环境空气平均温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

贮热水箱热损系数  $U_s$  和系统平均热损因数  $U_{SL}$  的关系为：

$$U_s = U_{SL} V_s \quad (12)$$

所以，系统平均热损因数为：

$$U_{SL} = \frac{\rho_w c_{pw}}{\Delta \tau} \ln \left[ \frac{t_i - t_{as(av)}}{t_f - t_{as(av)}} \right] \quad (13)$$

## 4 结果与分析

### 4.1 热水器得热量、平均日效率

分别选取 2010-12-19、12-20、12-23 的测试数据来分析，其测试数据如表 2 所示。图 2 表示测试天的水箱平均水温随时间的变化情况。

表 2 试验期间环境及相关热性能参数  
Table 2 Test environment and the relevant thermal performance parameters

日期/月-日	12-19	12-20	12-23
平均环境温度 $t_{ad}/^{\circ}\text{C}$	17.6	15.1	16.4
累积太阳辐照量 $H/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	19.44	17.04	17.73
集热开始时平均水温 $t_b/^{\circ}\text{C}$	16.7	16.2	16.9
集热结束时平均水温 $t_e/^{\circ}\text{C}$	66.2	57.5	60.6
温升 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	49.5	41.3	43.7
得热量 $Q_s/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	11.30	9.43	9.98
平均日效率/%	58.2	55.4	56.3

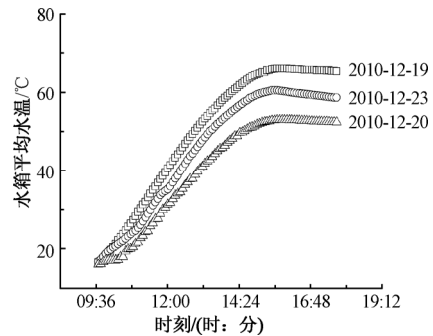


图 2 测试期间水箱平均水温随时间的变化

Fig.2 Average water temperature in the tank with time

从表 2 可以看出，系统温升会随着累积太阳辐照量的增加而增大，得热量、平均日效率也相应增大。其得热量的测试值符合国标关于分离式太阳能热水器日有用得热量  $Q_s \geq 7.0 \text{ MJ}/\text{m}^2$  的要求。但是图 2 表明，水箱平均水温在下午时增加趋于平缓，在下午 15:30 左右达到最大值，此后略有下降，此时热水器的效率也是下降的，且水温越高，效率越低，这是太阳辐照减少、环境温度下降而导致系统热损增大的后果<sup>[14]</sup>。

由式 (8) 可由最小二乘法确定系统的性能公式：

$$Q_s = 0.36667H + 0.495(t_{ad} - t_b) + 3.7265 \quad (14)$$

根据回归公式，当太阳辐射量为  $17 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ， $t_{ad} - t_b = 0$  时，系统得热量为  $9.96 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，系统平均日效率为  $58.6\%$ <sup>[15]</sup>。

### 4.2 热水器瞬时效率

选取 2010-12-23 的测试数据分析，详细数据见表 3。

表 3 12-23 瞬时效率参数

Table 3 Transient thermal efficiency parameters of December 23

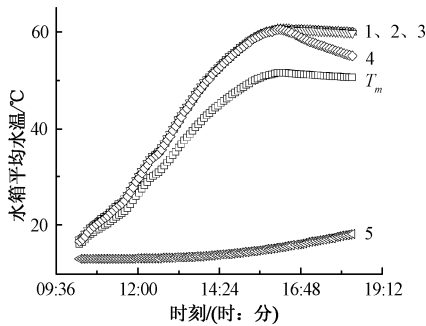
时间/时:分	累积太阳辐照量 $H/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	水箱平均水温 $t_m/^{\circ}\text{C}$	平均环境温度 $t_a/^{\circ}\text{C}$	瞬时效率/%
11:00	1.451	17.2	11.1	—
12:00	2.783	25.3	12.9	66
13:00	3.543	35.3	15.7	64
14:00	3.943	45.7	17.2	60
15:00	3.191	53.9	18.3	58
16:00	2.409	59.2	18.7	50
17:00	1.323	60.3	18.6	18
18:00	0.485	59.3	17.6	-47

由表 3 可以看出，热水器的瞬时效率随着时间及累

积太阳辐照量的增加而逐渐减小,在试验开始的第1 h内,瞬时效率最高,约为66%。在17:00~18:00之间,由于太阳辐照量很小,且环境温度降低,此时间段内热水器的瞬时效率为负,得热量小于热损失,即向外散热。

#### 4.3 水箱水温分层情况

对于立式承压换热保温水箱的水温分层情况,我们在测试时,在水箱内部上中下位置,布置了从8号到12号5个温度探头(见图1),选取2011-01-07的数据,其不同测点的温升情况如图3所示。



1. 水箱内的8号温度探头所测水温 2. 水箱内的9号温度探头所测水温  
3. 水箱内的10号温度探头所测水温 4. 水箱内的11号温度探头所测水温  
5. 水箱内的12号温度探头所测水温  $T_m$ . 水箱平均水温

图3 水箱水温分布情况

Fig.3 Water temperature distribution in the tank.

由图可以看出,这种水箱的温度分层情况不是很明显,换热盘管及以上范围内水箱水温相差不大,而处于换热盘管下方的水温偏低,远低于水箱其他位置的平均水温。水箱最下部的水处于换热盘管的下方,属于死水区,在白天基本交换不到热量,温升很小,而其他位置的水温上升很快,且非常接近,因此整个水箱的水温可认为是混合均匀的。

由图3还可以看出死水区的水温是持续缓慢增长的,而其他上部的水温在在增加的后期会慢慢趋于缓和,最后会缓慢降低。另外,由图3中4号温度探头所测温度变化的情况可以看出,其水温在末期迅速下降,这可能是由于在太阳辐照减小后,那部分水的热量通过热传递传递给了死水区中水的原因。所以,死水区的水温会在后期明显升高,如图3中5号温度探头所测温度变化的曲线所示。由此可以看出,立式换热水箱的温度分层情况与理论研究的结果有所差别,还需做更多的探讨工作。

#### 4.4 热水器的热损

分别选取2011年的01-06到01-07、01-07到01-08、01-08到01-09三次的过夜热损试验数据,见表4。

表4 热损试验数据

Table 4 Experimental data of heat loss

日期/月-日	01-06-01-07	01-07-01-08	01-08-01-09
平均环境温度 $t_{as(av)}/^{\circ}\text{C}$	9.4	12.0	11.6
开始时平均水温 $t_i/^{\circ}\text{C}$	52.2	57.5	55.6
结束时平均水温 $t_f/^{\circ}\text{C}$	48.5	53.2	51.8
温降 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	3.7	4.3	3.8
水箱热损系数 $U_d/(\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	2.37	2.60	2.36
系统平均热损因数 $U_{SL}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	13.14	14.43	13.13

可以看出,在不同的环境温度、初始温度、温降的情况下,热水器的平均热损因数变化不大,偏差范围在 $(13.5\pm 1)\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 以内,符合国标关于分离式太阳热水器平均热损因数 $U_{SL}\leq 22\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 的要求,说明分体式承压换热水箱的保温性能良好,可广泛应用在高层建筑中。

## 5 结论

根据国标所测试的分体承压阳台壁挂式平板型太阳热水器,当太阳辐照量为 $17\text{MJ}/\text{m}^2$ 时,其得热量为 $9.96\text{MJ}/\text{m}^2$ ,平均日效率为58.6%,热水器的平均热损因数在 $(13.5\pm 1)\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 左右,均能符合国家标准的要求。

试验表明,太阳辐照量是影响热水器温升、得热量、平均日效率及瞬时效率最为显著的因素;热水器瞬时效率会随着时间及太阳辐照量的增加而逐渐减小;分体承压换热水箱的温度分层情况不明显,应尽可能的降低换热盘管在水箱中的位置,减少死水区范围,但其全封闭承压结构、可放于室内、热损失小的优点十分明显,可广泛采用。

### 【参考文献】

- 卢素珍. 高层建筑规模化应用太阳能热水系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
Lu Suzhen. Study of Solar Water Heating System Integrated with High-rise Building for the Large Scale Application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- Eng. Malek Kabariti. Testing and evaluation of thermosyphon solar water heating system by means of components testing and whole system and simulation in Jordan[C]//WREC, 2006.
- Vassilis Belessiotis. Analytical approach of thermosyphon solar domestic hot water system performance[J]. Solar Energy, 2002, 72(4): 307-315.
- 杨坚. 平板型太阳能自然循环热水系统热性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.  
Yang Jan. Study on the Thermal Performance of the Flat Plate Thermosyphon Solar hot Water System[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)
- 张有刚. 夹层换热器水箱自然循环间接系统平板型太阳能热水器的热性能研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2008.  
Zhang Yougang. Study of the Thermal Performance of Natural Circulation Indirect System Flat Plate Solar Water Heater Fitting Tank with Mantle Heat Exchangers[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- 韩俊峰. 分体承压式太阳能热水器热性能分析与实验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.  
Han Junfeng. The Thermal Performance Analysis and Experimental Study of Split Pressure Solar Hot Water Heater[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- 周智勇, 彭三兵, 付祥钊, 等. 夏热冬暖地区强制间接循环太阳能热水系统[J]. 煤气与热力, 2009, 29(8): 35-39.

- Zhou Zhiyong, Peng Sanbing, Fu Xiangzhao, et al. Forced indirect cycle solar hot water system in hot summer and warm winter area[J]. GAS and HEAT, 2009, 29(8): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [8] 戚学贵, 陈则韶. 强制循环式太阳热水系统动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2002, 23(5): 575—579.  
Qi Xuegui, Chen Zeshao. Dynamic characteristics of forced circulation solar water heating systems[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2002, 23(5): 575—579. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 15—151.
- [10] 管巧丽. 太阳能-蓄热与地源热泵供热水系统的 TRNSYS 模拟与研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Gun Qiaoli. Study on Solar-Ground Coupled Heat Pump with Seasonal Storage by TRNSYS[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [11] GB/T 19141-2003, 家用太阳热水系统技术条件[S].  
GB/T 19141-2003, Specification of Domestic Solar Water Heating Systems[S]. (in Chinese with English abstract)
- [12] GB/T 18708-2002, 家用太阳热水系统热性能试验方法[S].  
GB/T 18708-2002, Test Methods for Thermal Performance of Domestic Solar Water Heating Systems[S]. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘继者. 热管平板式太阳能集热器和太阳能热水系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
Liu Jizhe. Study on the Heat Pipe Flat Plate Solar Collector and the Solar Water Heating System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王俊琪, 张新星, 陈禹绩, 等. 太阳辐射对太阳能热水器换热性能影响研究[J]. 苏州大学学报, 2009, 29(4): 41—44.  
Wang Junqi, Zhang Xinxing, Chen Yuji, et al. Research on the influences on solar radiation to solar water heater heat-transfer[J]. Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition), 2009, 29(4): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [15] 段征强, 赵军. 真空管太阳能热水器冬季热性能研究[J]. 节能技术, 2006, 24(5): 458—469.  
Duan Zhengqiang, Zhao Jun. Thermal performance of vacuum tube solar water heater in winter[J]. Energy Conservation Technology, 2006, 24(5): 458—469. (in Chinese with English abstract)

## Thermal performance of solar water heater hanged on balcony wall with separate pressure bearing

Ding Xiang, Gao Wenfeng<sup>\*</sup>, Liu Tao, Lin Wenxian

(Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials of the Ministry of Education of China, solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

**Abstract:** In this paper, an analysis has been conducted on an indirect forced circulation solar water heater which is hanged on the balcony wall with separate pressure bearing, a mathematical model was established for this heater, and experiments and calculations have been carried out to obtain the useful heat, daily average thermal efficiency, transient thermal efficiency, heat loss coefficient of the heater, etc., under clear day conditions in winter in Kunming, China. The results show that the thermal performance of such a solar heater is superior, it meets the requirements of the national standards and the residential water usage, and is suitable for utilization integrated with buildings; Solar radiation is the most profound parameter to dictate the thermal performance of the heater; The insulation performance of the storage tank with separate pressure bearing is superior. Nevertheless, the results also demonstrate that further studies are needed to explore in-depth the temperature stratification in the heat storage tank.

**Key words:** useful heat, solar radiation, solar water heater, separate pressure bearing, indirect forced circulation, thermal performance